

Schaltkreis-Analysetechniken

Eingangsseitige Kleinsignalleitwerte: g_m , $r_m = 1/g_m$ und r_{BE} :

Kleinsignalgrößen, im Arbeitspunkt berechnen:

Übertragungsleitwert :

Eingangswiderstand in die Basis "schauend":

Eingangswiderstand von der Basis aus gemessen:

BJT: Bipolar Junction Transistor

$$g_m = dI_C/dU_{BE} = I_C/u_T$$

$$r_m = 1/g_m$$

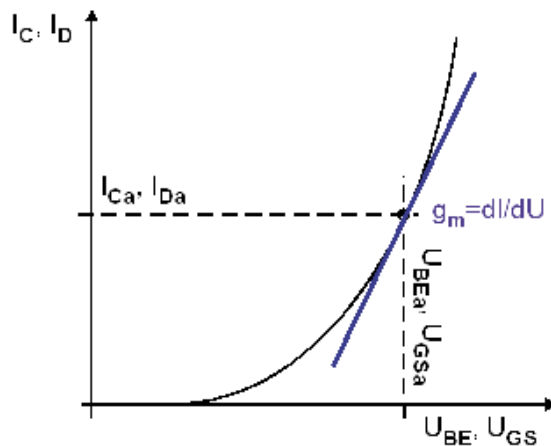
$$r_{BE} = \beta r_m$$

FET: Field Effect Transistor

$$g_m = dI_D/dU_{DS} = 2\sqrt{\beta \cdot I_D}$$

$$r_m = 1/g_m$$

$$r_{GS} \rightarrow \infty$$



g_m ist die Steigung der Kurve $I_{out}(U_{steuer})$ und ist – besonders für den BJT – nur für kleine Auslenkungen um den Arbeitspunkt näherungsweise konstant.

Ausgangsseitige Kleinsignalleitwerte $g_{CE} = 1/r_{CE}$ und $g_{DS} = 1/r_{DS}$:

BJT: $I_C = I_{C0} \left(1 + \frac{U_{CE}}{V_A}\right)$ mit $I_{C0} = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$

$\beta = \beta_0 \left(1 + \frac{U_{CE}}{V_A}\right)$ da $\beta = I_C / I_B$

$g_{CE} = dI_C / dU_{CE} = I_{Ca} / (V_A + U_{CEa}) \approx I_{Ca} / V_A$

$r_{CE} = 1/g_{CE}$

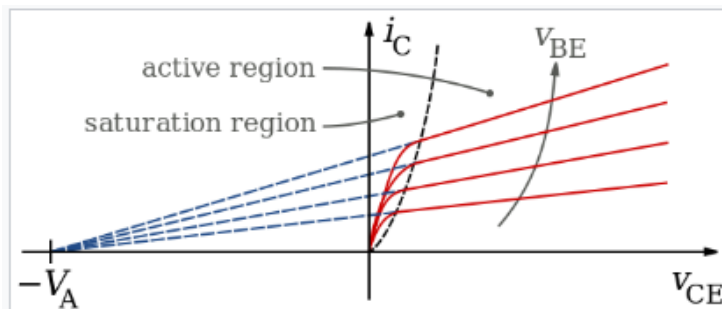


Figure 2. The Early voltage (V_A) as seen in the output-characteristic plot of a BJT.

Foto: https://en.wikipedia.org/wiki/Early_effect

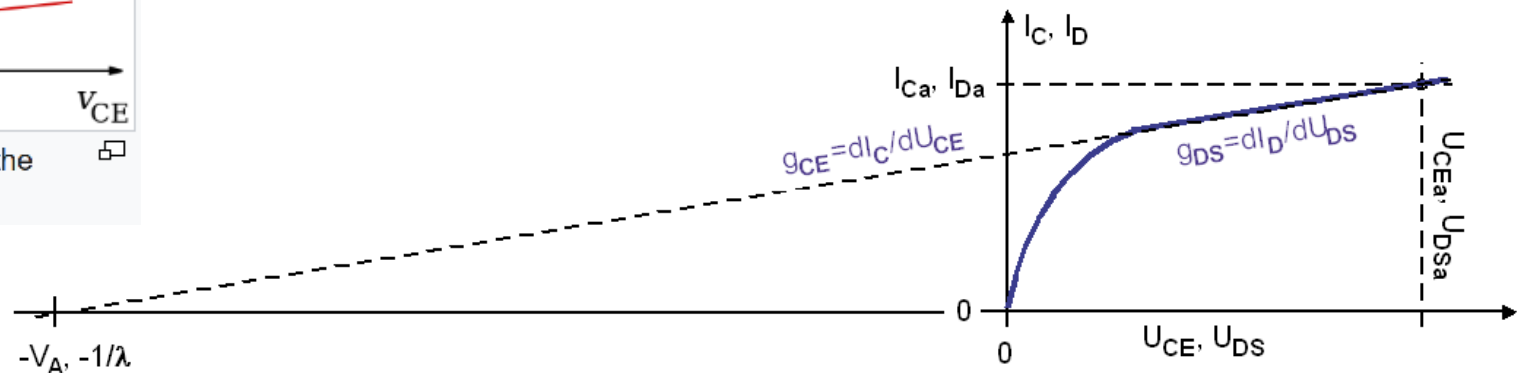
FET: $I_D = I_{Dsat} (1 + \lambda U_{DS})$

$I_{Dsat} = \beta (U_{GS} - U_{Th})^2$ für $U_{DS} > U_{DS,sat}$

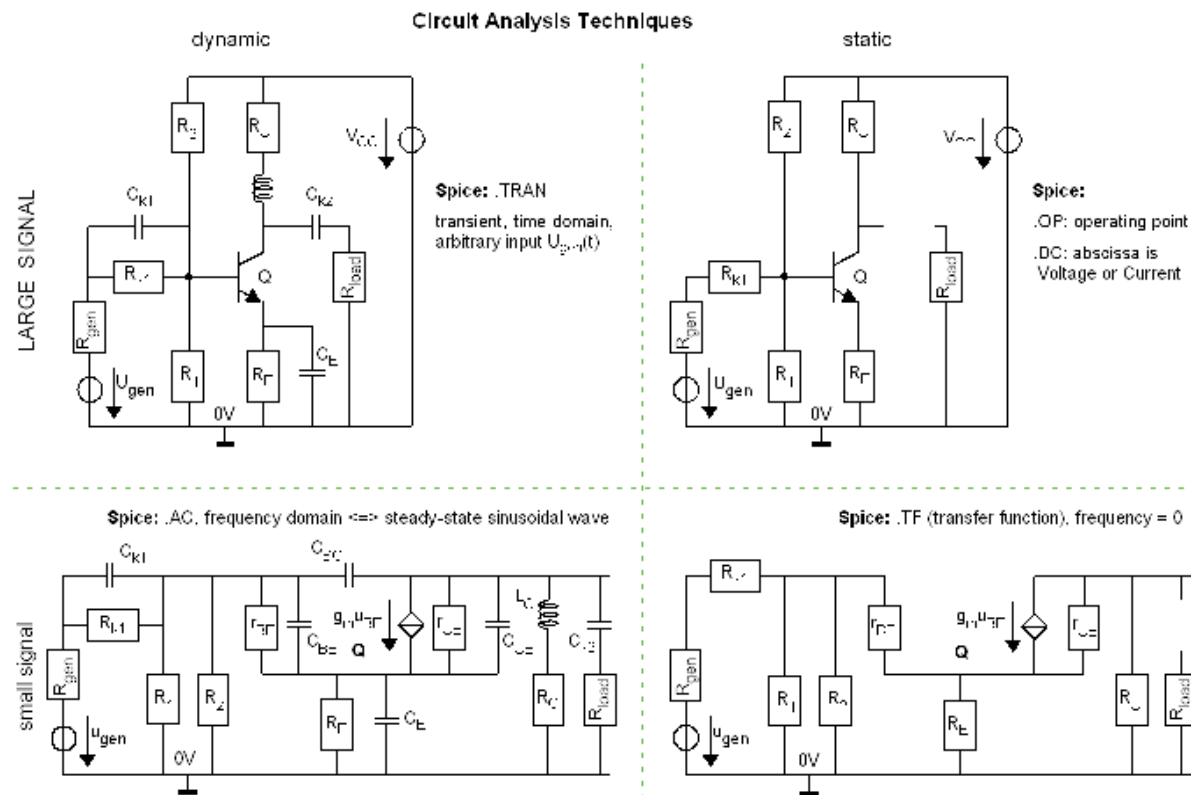
$U_{GS} - U_{Th} = U_{DS,sat}$

$g_{DS} = dI_D / dU_{DS} = I_{Da} / (1/\lambda + U_{DSa}) \approx \lambda \cdot I_{Da}$

$r_{DS} = 1/g_{DS}$



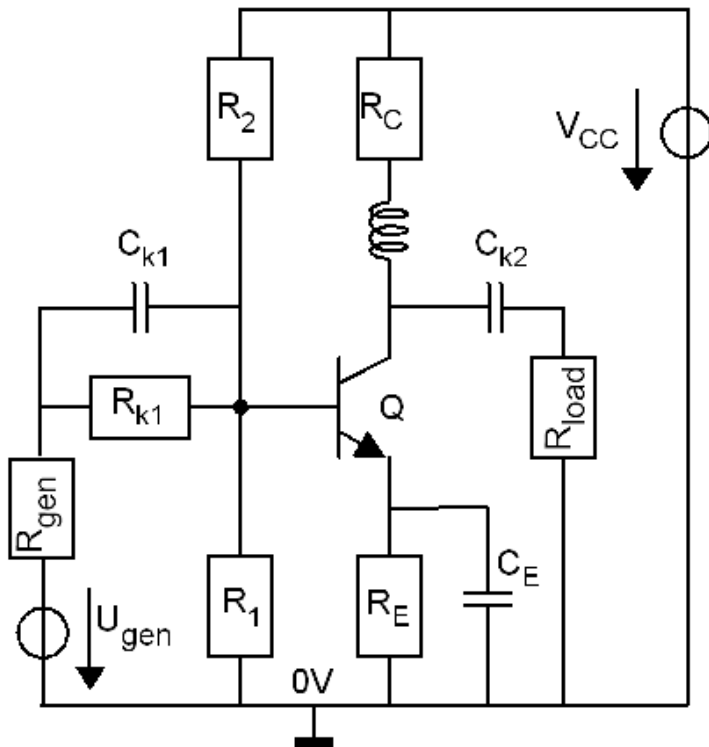
Einige Schaltkreisanalyse-Techniken



Es gibt weitere Analysearten
wie .noise oder .sens[itivity]

.TRAN: Transient, Zeitbereichssimulation

lat. trans-ire = hinüber-gehen

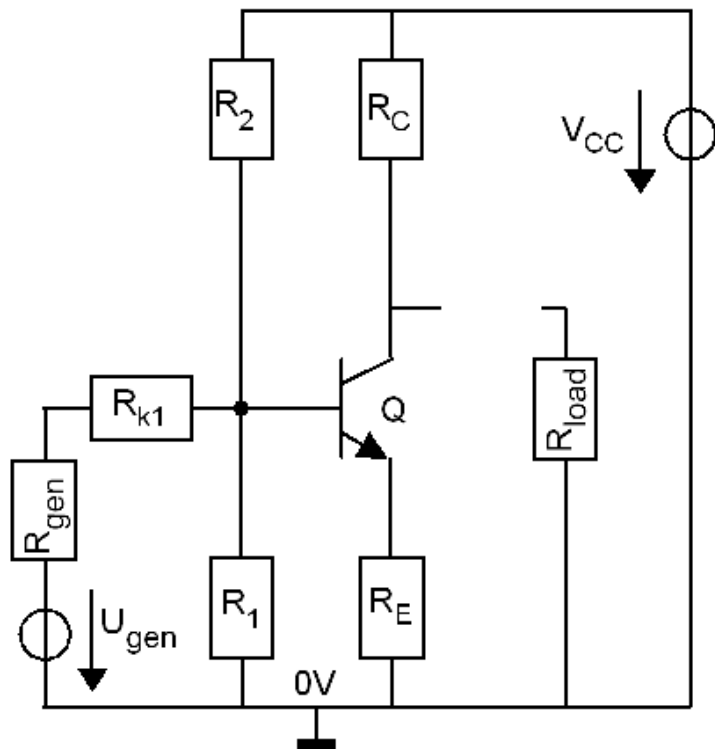


Als wird ein Arbeitspunkt berechnet.

Dann kann das Modell über der Zeitachse simuliert werden.

Davon ausgehend fährt der Simulator mit adaptiven Zeitschritt-Weiten, nichtlinearen Modellen (z.B. Dioden, Transistoren) und Berücksichtigung der Differentialgleichungen für Kapazitäten ($I_C = dU_C/dt$) und Induktivitäten ($U_L = dI_L/dt$) fortfahren auf der Zeitachse zu simulieren.

.OP und .DC Analyse



Der Arbeitspunkt (engl. Operating Point) muss immer als erstes Berechnet werden.

Die Direktive .OP macht ihn für den Anwender sichtbar.

Die Direktive .DC berechnet eine DC-Kennlinie aus mehreren OP's.

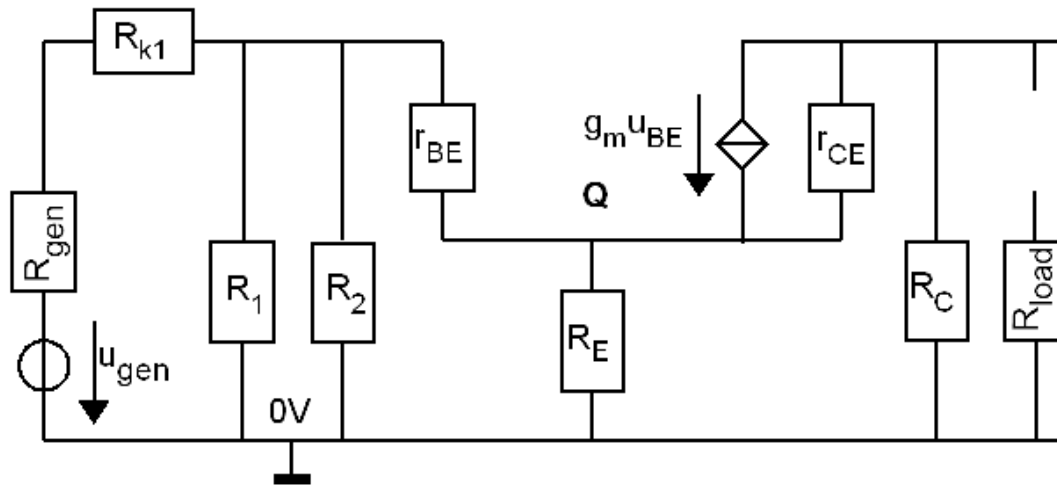
Großsignal-Rechnung: Nichtlineare Bauelemente bleiben nichtlinear.
Kapazitäten werden zu Unterbrechungen
Induktivitäten werden zu Kurzschlüssen.

Wenn es für den Simulator schwierig wird einen OP zu berechnen,
Kann der Nutzer ihm helfen:

.NodeSet V(node)=3V erzwingt die angegebene Spannung

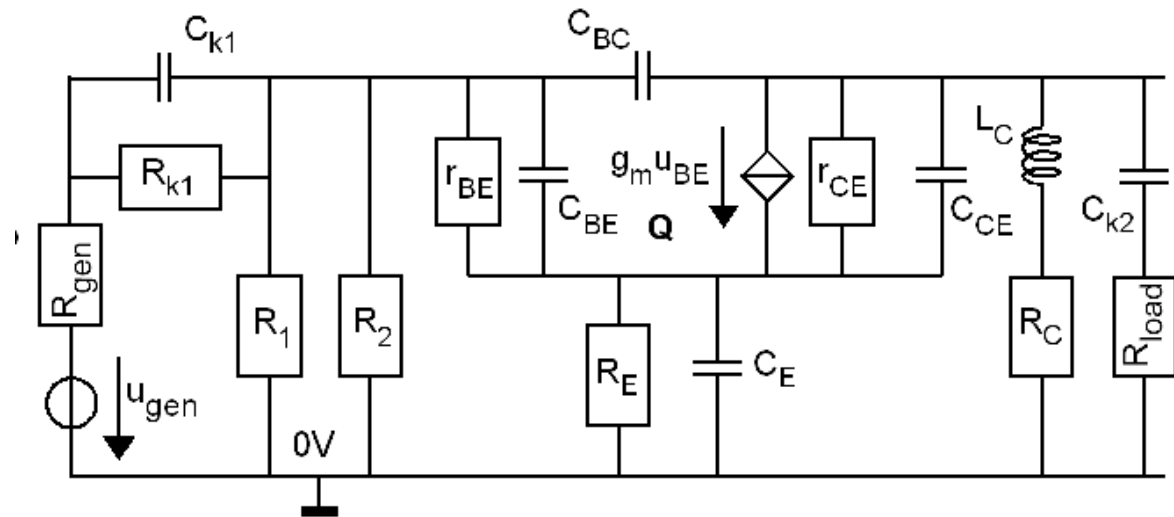
.IC V(node)=3V: "Initial Conditions" berechnet zuerst eine Lösung mit .NodeSet und gibt den Knoten dann frei, um eine genaue Lösung zu berechnen. (Sinnvoll z.B. bei Flipflops).

.TF Analyse: DC-Transfer-Funktion



1. Berechnen des Arbeitspunktes, dabei werden die Kleinsignalgrößen zu Null gesetzt
2. Berechnen der DC-Kleinsignalmodelle im Arbeitspunkt.
3. Null-setzen aller Großsignalgrößen (z.B. $V_{CC} \Rightarrow 0V$ = Kurzschluss, $I_q \Rightarrow 0A$ = Unterbrechung, $U_{BEa} + u_{BE} \Rightarrow u_{BE}$),
4. Ersetzen nichtlinearer Bauelemente durch ihre Kleinsignalmodelle

.AC Analyse



1. Berechnen der .TF-Analyse.
2. Kleinsignal-Kapazitäten und –Induktivitäten im Arbeitspunkt (z.B. pn-Junction-Kapazitäten)
3. Zufügen der Blindleister (Kapazitäten und Induktivitäten) zum .TF-Modell
4. Simulation der Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ im Frequenzbereich (i.e. über der Frequenzachse)

Anm.: a) Linearisierte Modelle bleiben linear, z.B. g_m bei einer Amplitude von $u_{BE}=1V$, auch wenn dies z.B. mit $u_T=26mV$ bei $g_m=(I_{BS}/u_T) \cdot \exp(U_{BE}/u_T)$ unrealistisch große Rechenfehler (aufgrund der realen Nichtlinearität) bewirkt,
 b) Es können Ausgangsspannungen von z.B. 100.000V gemessen werden bei Betriebsspannung von 0/3,3V.
 c) Es ist sinnvoll im AC-Statement der Eingangsgröße die Amplitude 1 zu wählen, weil man dann Verstärkungen direkt in dB ablesen kann. Ansonsten bekommt man Verstärkungen mit $V(out)/V(in)$; "in", "out" Knotenlabels.